

(11)Publication number : **2000-097742**
(43)Date of publication of application : **07.04.2000**

G01F 1/66
G01P 5/00

(71)Applicant : TOKYO ELECTRIC POWER CO
INC:THE

(72)Inventor : MORI HARUTSUGU
TAKEDA YASUSHI

[illegible]

$$m(t) = \rho \int_{\mathbb{R}^n} \varphi(x+t) \cdot f \, dx$$

世に於ては、諸國の政治は、

$\nabla(x, t)$: 時刻 t における位置

<http://www19.ipdl.ncipi.go.jp/PA1/result/detail/main/wAAAMgaG6XDA412097742...> 2006/06/08

of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection] 07.11.2002

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2000-97742
(P2000-97742A)

(43)公開日 平成12年4月7日(2000.4.7)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード(参考)
G 0 1 F 1/66	1 0 3	G 0 1 F 1/66	1 0 3 2 F 0 3 5
G 0 1 P 5/00		G 0 1 P 5/00	C

審査請求 未請求 請求項の数6 O L (全 13 頁)

(21)出願番号 特願平10-272359

(22)出願日 平成10年9月25日(1998.9.25)

(71)出願人 000003687

東京電力株式会社

東京都千代田区内幸町1丁目1番3号

(72)発明者 森 治嗣

神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号

東京電力株式会社原子力研究所内

(72)発明者 武田 靖

スイス 5200 ブルッグ レープモースヴ

ェグ 75イー

(74)代理人 100078765

弁理士 波多野 久 (外1名)

Fターム(参考) 2F035 DA12

(54)【発明の名称】 ドップラ式超音波流量計

(57)【要約】

【課題】超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流速分布から流量を、定常状態のみならず、非定常状態であっても、精度よく時間依存で正確に測定することができるドップラ式超音波流量計を提供する。

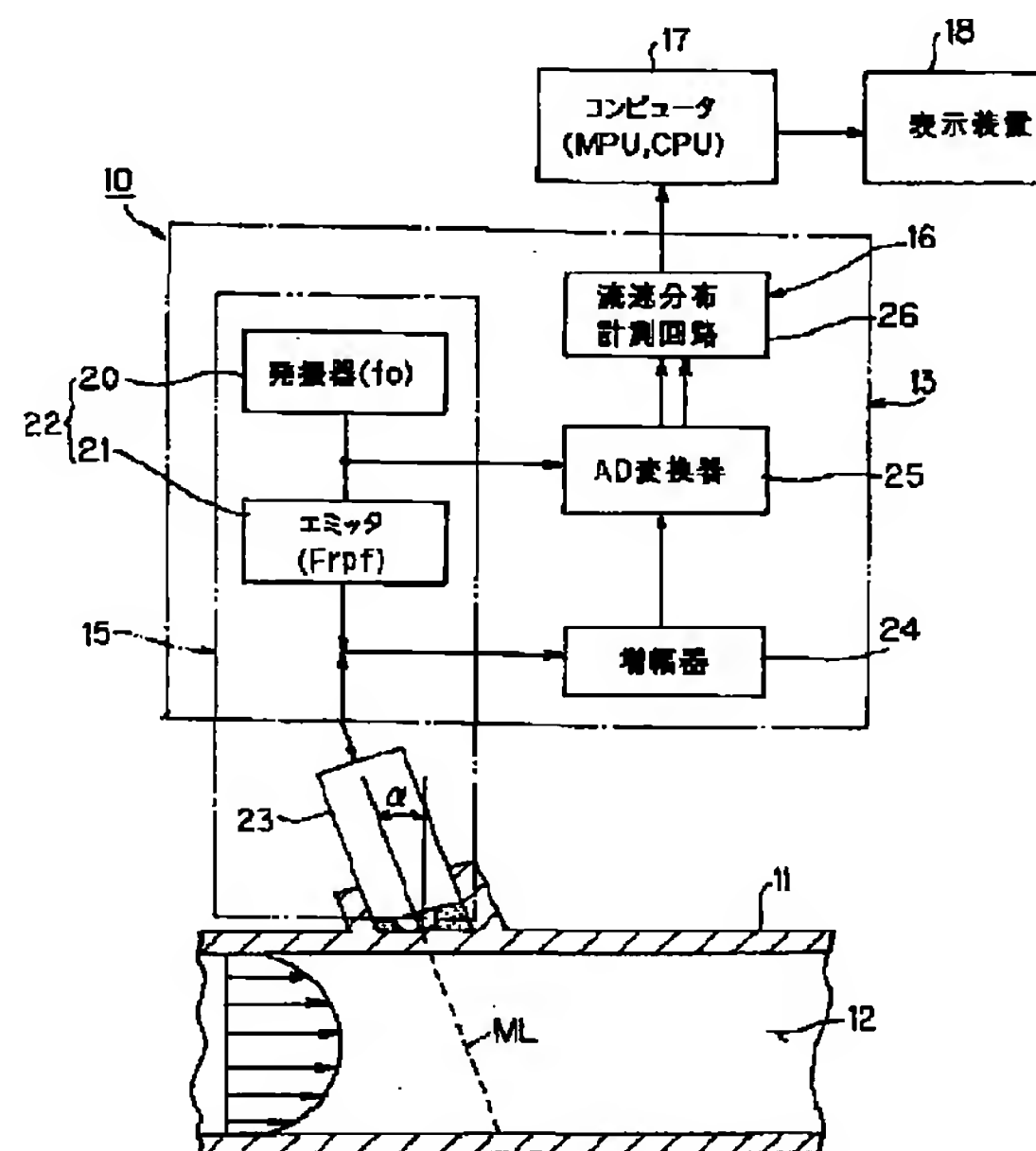
【解決手段】ドップラ式超音波流量計は、所要周波数 f_0 の超音波パルスを超音波トランスジューサ23から測定線MLに沿って被測定流体中に入射させる超音波送信手段15と、被測定流体12に入射された超音波パルスのうち測定領域から反射された超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体12の流速分布を測定する流体速度分布測定手段16と、上記被測定流体12の流速分布に基づいて、流量を $m(t)$ とするとき、

【数11】

$$m(t) = \rho \int v(x,t) \cdot dA$$

但し、 ρ : 被測定流体の密度
 $v(x,t)$: 時間 t に沿った流速成分

の演算を行なう流量演算手段17とを備えたものである。流量演算手段17は測定領域における被測定流体12の流速分布に基づいて流量を計測するようにしたものである。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 所要周波数の超音波パルスを超音波トランスジューサから測定線に沿って被測定流体中に入射させる超音波送信手段と、被測定流体に入射された超音波パルスのうち測定領域から反射された超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体の流速分布を測定する流体速度分布測定手段と、上記被測定流体の流速分布に基づいて、流量を $m(t)$ とするとき、

【数 1】

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA$$

但し、 ρ : 被測定流体の密度

$v(x \cdot t)$: 時間 t における速度成分

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \sum_{i=1}^N \frac{\pi}{N} \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr$$

但し、 $v_x(r \cdot \theta \cdot t)$: 時間 t における配管横断面上の管軸方向の速度成分

の演算を行なうように設定された請求項 1 記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項 3】 超音波送信手段から送信される超音波パルスは、配管の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせる基本周波数が選択されるようにした請求項 1 記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項 4】 超音波トランスジューサは配管の周方向に所要の間隔をおいて N 個 ($N \geq 2$) 設ける一方、各超音波トランスジューサから放射される超音波パルスの測定線は、配管の放射方向に対し角度 α だけ傾斜させて配置した請求項 1 または 2 記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項 5】 測定領域は二次元平面であり、上記測定領域に沿って超音波パルスを入射させる超音波トランスジューサを少なくとも 2 つ設け、一方の超音波トランスジューサからの超音波パルスによる測定線が他方の超音波トランスジューサからの測定線と前記測定領域で少なくとも 1 回交差するように配置した請求項 1 記載のドップラ式超音波流量計。

【請求項 6】 測定領域は二次元平面であり、上記測定領域に沿って超音波パルスを入射させる超音波トランスジューサが 3 個ずつ組をなして 2 組以上設けられ、上記組を構成する 3 個の超音波トランスジューサは前記測定領域上の 1 点で交差するように配置した請求項 1 記載のドップラ式超音波流量計。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流量を測定するドップラ式超音波流量計に係り、特に測定領域の流速分布から被測定流体の流量を時間依存で瞬時に測定するドップラ式

の演算を行なう流量演算手段とを備え、上記流量演算手段で前記測定領域における被測定流体の流量を計測するようにしたことを特徴とするドップラ式超音波流量計。

【請求項 2】 被測定流体は配管を流れる流体であり、 N 個 ($N \geq 1$) の超音波トランスジューサは配管の外周側に周方向に間隔をおいて、かつ送信される超音波パルスの測定線が配管の中心軸線上の所定点を通るように配置される一方、前記流量演算手段は、前記配管内を流れる被測定流体の流量を $m(t)$ とするとき、

【数 2】

超音波流量計に関する。

【0002】

【従来の技術】 配管内を流れる被測定流体の流量を測定する流量計には、測定原理により 2 種類に大別される。

【0003】 第 1 の流量計は、配管内を流れる流体のプロセス量が流れ方向に変化することを利用して流量を測定するものであり、この種の流量計には、オリフィス流量計がある。オリフィス流量計はオリフィス上流側と下流側とで流体の圧力が異なることを利用して流量を計測するものであり、このような流量計測方法を、以下「平均値近似法」という。

【0004】 第 2 の流量計は、主に円管等の配管内の流れの流量測定に用いられるものである。

【0005】 この流量計では、配管内の流れの一点、例えば管軸上の所定点での流速を測定し、得られた測定値に基づいて理論値から配管内の流速分布形状を仮定し、この流速分布形状を積分して流量を求めるものである。このような流量測定方法を、以下「近似積分法」という。

【0006】 一方、流量計の中には、測定対象である被測定流体に超音波を照射して流体の流量を計測する超音波流量計が知られている。

【0007】 この超音波流量計には、平均値近似法により流量を計測するものと、近似積分法により流量を計測するものに大別される。

【0008】 平均値近似法を採用した超音波流量計は、超音波パルスが一定の間隔の 2 点間を通過するのに要する時間が、超音波パルスが流体の流れの上流に向けて進む場合と、その逆に流れの下流に向けて進む場合とで、流体の流れの速度だけ異なることを利用し、所定の 2 点間の平均速度を求め、流量を計測するものである。

【0009】また、近似積分法を採用した超音波流量計は、配管の中心軸上の一点での被測定流体の速度をドップラシフト法を利用して求め、この流体速度から流量を計測するものであり、特開平6-294670号公報に開示されたものがある。この近似積分法の超音波流量計では、理論値あるいは経験則から流速分布の形を求めて積分を行なうものである。例えば、配管内の層流領域では流速分布は放物線で表われるから、管壁での境界条件を使用することにより、中心軸上で測定された流体速度を用いて流量を求めることができる。この理論解は、厳密には定常状態の流れに対して成立するものであるの

で、近似積分法の超音波流量計は、定常状態の流れにしか適用できず、非定常状態の流れには対応することができない。

【0010】一般に、粘性流体の流れは、ナビア・ストウスク (Navier-Stokes: NS) の方程式として良く知られている。従来の超音波流量計は、NS方程式の時間微分項を無視して定常状態に対する流動分布の知識を利用して流量を求めている。このため、流量が時間的に変動し、近似積分法が成立しない流動場（流体の流れの場）が測定対象である場合には、測定精度が著しく低下したり、測定結果の有効性が損われる虞がある。

【0011】このような流動場として、例えば平均流量を出すに必要な時間より流量系の変動時間が短い流動場や、流れが十分に発達していない流動場が挙げられる。前者の場合には、NS方程式の時間微分項がゼロにならず、後者の場合には、NS方程式の一次元近似が成立しない。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】従来の流量計では、定常状態における流量計測であり、十分な精度で流量測定を行なうためには、例えば測定箇所の上流側に流れを発達させる助走路を非常に長くとる必要があり、配管施設に時間とコスト、労力を要する一方、定常状態の流れの流量計測であるため、非定常状態の流れの流量計測を行なうことが困難であった。

【0013】また、従来の流量計は、円管などの閉じた配管内を流れる流体の平均流量を測定対象とするため、より大きな流量体系の局所的な流量を測定することが不可能であった。例えば、非常に大きな攪拌槽の入口付近あるいは出口付近の時間変動を伴う特徴的な流量計測は、いずれの流量計においても測定不可能であった。

【0014】ところで、三次元空間の流量場における被測定流体の流れは、三次元のベクトル量で表わされるのに対して、従来の流量計は、配管内に一次元の流れを仮定して流量計測を行なうものである。このため、閉じた配管内であっても、流れが三次元的になっている場合には、流量の測定精度が非常に悪くなったり、不可能となる。例えば、エルボ配管やU字状の反転配管のように曲げられた配管の直後では、流体の流れが遠心力作用によ

り三次元的になっており、このような場所に従来の流量計を設置しても流量計測を有効的に行なうことができない。

【0015】本発明は、上述した事情を考慮してなされたもので、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流量を、定常状態の流れのみならず、非定常状態の流れであっても、時間依存で正確に精度よく測定することができるドップラ式超音波流量計を提供することを目的とする。

10 【0016】本発明の他の目的は、配管内を流れる被測定流体の流速分布を測定し、時間的に変動する過渡時の流量を応答性に優れ、精度よく非接触で計測することができるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0017】本発明のさらに他の目的は、流体の流れが十分に発達していない箇所や流れが三次元になっている場所でも被測定流体の流量を効率的に精度よく瞬時に測定できるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

20 【0018】また、本発明の別の目的は、大きな空間を流れる流量系の一部の流量を部分的に測定することができるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0019】本発明のさらに別の目的は、光学的流量測定方法が適用できない不透明あるいは半透明の流体であっても流量を精度よく正確に測定することができるドップラ式超音波流量計を提供するにある。

【0020】

【課題を解決するための手段】本発明に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、請求項1に記載したように、所要周波数の超音波パルスを超音波トランスジューサから測定線に沿って被測定流体中に入射させる超音波送信手段と、被測定流体に入射された超音波パルスのうち測定領域から反射された超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体の流速分布を測定する流体速度分布測定手段と、上記被測定流体の流速分布に基づいて、流量を $m(t)$ とするとき、

【数3】

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA$$

但し、 ρ ：被測定流体の密度

$v(x \cdot t)$ ：時間 t における速度成分

40 の演算を行なう流量演算手段とを備え、上記流量演算手段で前記測定領域における被測定流体の流量を計測するものである。

【0021】請求項2に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、被測定流体は配管を流れる流体であり、 N 個 ($N \geq 1$) の超音波トランスジューサは配管の外周側に周方向に間隔をおいて、かつ送信される超音波パルスの測定線が配管の中心軸線上の所定点を通るように配置される一方、前記流量演算手段は、前記配管内を流れる被測定流体の流量を $m(t)$ と

【数 4】

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r, \theta, t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \sum_i^N \frac{\pi}{N} \int v_x(r, \theta, t) \cdot r \cdot dr$$

但し、 $v_x(r, \theta, t)$: 時間 t における配管横断面上の管軸方向の速度成分

の演算を行なうように設定されたものである。

【0022】請求項 3 に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、超音波送信手段から送信される超音波パルスは、配管の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせる基本周波数が選択されるものである。

【0023】請求項 4 に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、超音波トランスジューサは配管の周方向に所要の間隔をおいて N 個 ($N \geq 2$) 設ける一方、各超音波トランスジューサから放射される超音波パルスの測定線は、配管の放射方向に対し角度 α だけ傾斜させて配置したものである。

【0024】請求項 5 に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、測定領域は二次元平面であり、上記測定領域に沿って超音波パルスを入射させる超音波トランスジューサを少なくとも 2 つ設け、一方の超音波トランスジューサからの超音波パルスによる測定線が他方の超音波トランスジューサからの測定線と前記測定領域で少なくとも 1 回交差するように配置したものである。

【0025】請求項 6 に係るドップラ式超音波流量計は、上述した課題を解決するために、測定領域は二次元平面であり、上記測定領域に沿って超音波パルスを入射させる超音波トランスジューサが 3 個ずつ組をなして 2 組以上設けられ、上記組を構成する 3 個の超音波トランスジューサは前記測定領域上の 1 点で交差するものである。

【0026】

【発明の実施の形態】本発明に係るドップラ式超音波流量計の実施の形態について添付図面を参照して説明する。

【0027】図 1 は本発明に係るドップラ式超音波流量計の第 1 実施形態を示す図である。ドップラ式超音波流量計 10 は配管 11 内を流れる液体や気体等の被測定流体 12 の流速分布を測定し、流量を時間依存で瞬時に測定するものである。

【0028】ドップラ式超音波流量計 10 は、配管 11 内を流れる被測定流体 12 の流速を非接触で測定する超音波速度分布計測ユニット（以下、UVP ユニットという。）13 を備える。UVP ユニット 13 は被測定流体 12 に測定線 ML に沿って所要周波数（基本周波数 f_0 ）の超音波パルスを送信させる超音波送信手段 15 と、被測定流体 12 に入射された超音波パルスの測定領

域から反射された超音波エコーを受信し、測定領域における被測定流体 12 の流速分布を測定する流体速度分布測定手段 16 と、被測定流体 12 の流速分布に基づいて演算処理して半径方向の積分を行ない、被測定流体 12 の流量を時間依存で求める流量演算手段としてのマイコン、CPU、MPU 等のコンピュータ 17 と、このコンピュータ 17 からの出力を時系列的に表示可能な表示装置 18 とを有する。

【0029】超音波送信手段 15 は、所要周波数、例えば 1 MHz、2 MHz、4 MHz 等の基本周波数 f_0 の電気信号を発生させる発振器（オシレータ）20 と、この発振器 20 からの電気信号を所定の時間間隔（ $1/F_{\text{rpf}}$ ）毎にパルス状に出力するエミッタ 21（周波数 F_{rpf} ）とからなる信号発生器 22 を備え、この信号発生器 22 から基本周波数 f_0 のパルス電気信号が超音波トランスジューサ 23 に入力される。超音波トランスジューサ 23 はパルス電気信号の印加により基本周波数 f_0 の超音波パルスが測定線 ML に沿って発信せしめられる。超音波パルスは例えばパルス幅 5 mm 程度で拡がりをはほとんど持たない直進性のビームである。

【0030】超音波トランスジューサ 23 は送受信器を兼ねており、超音波トランスジューサ 23 は発信された超音波パルスが流体中の反射体に当たって反射される超音波エコーを受信するようになっている。反射体は被測定流体 12 中に一様に含まれる気泡であったり、A1 の微粉末等のパーティクルであったり、または被測定流体 12 とは音響インピーダンスが異なる異物である。

【0031】超音波トランスジューサ 23 に受信された超音波エコーは、このトランスジューサ 23 でエコー電気信号に変換される。このエコー電気信号は増幅器 24 で増幅された後、AD 変換器 25 を通ってデジタル化され、このデジタルエコー信号が流速分布計測回路 26 に入力される。流速分布計測回路 26 には、発振器 20 からの基本周波数 f_0 の電気信号がデジタル化されて入力され、両信号の周波数差からドップラシフトに基づく流速の変化を計測し、測定線 ML に沿う測定領域の流速分布を算出している。測定領域の流速分布を傾斜角 α で校正することで配管 11 の横断面における流速分布を計測することができる。

【0032】次に、図 2 を参照してドップラ式超音波流量計 10 の作動原理を説明する。

【0033】図 2 (A) に示すように、超音波トランスジューサ 23 を配管 11 の放射方向に対し角度 α だけ被

測定体の流れ方向に傾けて設置した状態で、超音波トランスジューサ 23 から所要周波数 f_0 の超音波パルスを入射させると、この超音波パルスは測定線 ML 上の被測定流体 12 に一様に分布する反射体に当って反射し、図 2 (B) に示すように、超音波エコー a となって超音波トランスジューサ 23 に戻される。なお、図 2 (B) において符号 b は超音波パルス入射側の管壁で反射する多重反射エコーであり、符号 c は、反対側管壁で反射する多重反射エコーである。超音波トランスジューサ 23 から発信される超音波パルスの発信間隔は $1/F_{\text{rep}}$ である。

【0034】そして、超音波トランスジューサ 23 で発信したエコー信号をフィルタリング処理し、ドップラシフト法を利用して測定線 ML に沿って流速分布を計測すると、図 2 (C) のように表示される。この流速分布は UVP ユニット 13 の流体速度分布測定手段 16 で測定

$$m(t) = \rho \int v(x \cdot t) \cdot dA \quad \dots (1)$$

但し、 ρ : 被測定流体の密度

$v(x \cdot t)$: 時間 t における速度成分 (x 方向)

(1) 式から配管 11 を流れる時間 t の流量 $m(t)$ は、次式に書き換えることができる。

【0038】

【数 6】

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r \cdot \theta \cdot t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad \dots (2)$$

但し、 $v_x(r \cdot \theta \cdot t)$: 時間 t における配管横断面上の中心から

距離 r 、角度 θ の管軸方向の速度成分

(2) 式より、ドップラ式超音波流量計 10 は、被測定流体 12 の流れの空間分布を瞬時、例えば 50 msec ~ 100 msec 程度の応答速度で得ることができる。被測定流体 12 は配管 (円管) 11 内の流れであっても、十分な助走区間をとれない場合や、弁の開閉やポンプの起動・停止などで時間的な揺らぎが存在する場合には、流体の流れは非定常状態で三次元分布をもっているが、このドップラ式超音波流量計 10 は、測定領域の流速分布を時間依存で瞬時に求めることができるので、被測定流体 12 の流量を定常状態、非定常状態如何を問わず、正確に精度よく求めることができる。

【0039】ドップラ式超音波流量計 10 は、超音波パルスエコーのドップラシフトを利用した流速分布の線測定法で被測定流体の流量を測定するものであるから、測

$$m(t) = \sum_i^N \cdot \frac{2\pi}{N} \int_{-R}^R \{v_x(r \cdot \theta_i \cdot t) / \sin \alpha\} \cdot r \cdot dr \quad \dots (3)$$

このように、求められた被測定流体 12 の流量は、表示装置 18 により時間依存で瞬時に表示することができる。この表示装置 18 には、被測定流体 12 の配管 11 内の測定線 ML に沿う流速分布あるいは配管横断面における流速分布を表示することもできる。

(A) 超音波透過率特性について

ところで、本発明者は、超音波トランスジューサ 23 を

することができる。

【0035】ドップラシフト法は、配管 11 内を流れる流体 12 中に超音波パルスを放射すると、流体 12 中に混在あるいは一様分布の反射体によって反射され、超音波エコーとなり、この超音波エコーの周波数が流速に比例した大きさだけ周波数シフトする原理を応用したものである。

【0036】また、超音波流体速度分布測定手段 16 で測定された被測定流体 12 の流速分布信号は流量演算手段としてのコンピュータ 17 に送られ、ここで流速分布信号を配管 11 の半径方向に積分し、被測定流体 12 の流量を時間依存で求めることができる。この流体 12 の時間 t における流量を $m(t)$ とすると、次式で表わすことができる。

【0037】

【数 5】

定精度を向上させるためには、測定線 ML の数、ひいては超音波トランスジューサ 23 の設置台数を増やす必要がある。実際には後述する N 個の超音波トランスジューサ 23 を配管 11 の周方向に所要の間隔をおいて設置し、測定線 ML は管壁への垂線に対し角度 α 傾斜させ、全ての測定線 ML が配管 11 の軸線を通るようにセットされる。

【0040】そこで、配管 11 内を流れる被測定流体 12 の流れが、管軸方向の流れで半径方向や角度 θ の流れ v_r 、 v_θ を無視できるとすると、 $v_x \gg v_r = v_\theta$ となり、流量計測は簡素化され、次式で表わされる。

【0041】

【数 7】

配管 11 の外壁に設置するに当り、超音波ビーム (超音波パルス) の管透過特性を検証したところ、超音波の基本周波数と壁厚との間に共鳴的な透過現象が存在することを初めて知見した。

【0042】超音波流量計 10 を用いた配管 11 内の流速分布、ひいては流量の測定では、超音波トランスジューサ 23 から発信された超音波パルスは配管壁を透過し

て被測定流体 12 内に入り、流体中の反射体と反射して超音波エコーを生じ、この超音波エコーは再び配管壁を透過して同じトランスジューサ 23 で受信される。その際、超音波エコー信号の SN 比は配管壁である固体壁を透過する超音波透過率に大きく影響される。

【0043】超音波透過率は、流体と固体の音響インピーダンス比に係わることが知られている。被測定流体が水である場合、水から金属製固体壁へ超音波を透過させる場合、音響インピーダンス比が大きいため、透過率が低い。このため、金属壁である配管外からの超音波測定は、測定上の困難さがあつた。

【0044】しかしながら、超音波透過率は、壁厚や超

$$D = 1 / \sqrt{1 + 1/4 (m-1/m) \cdot \sin(2\pi d/\lambda)} \quad \dots\dots (4)$$

但し、 $m = z_1 / z_2$ で λ は超音波パルスの波長である。

図 3 はアクリル樹脂およびステンレス鋼と水との超音波透過率を示す図である。符号 e はステンレス鋼の超音波透過曲線を、符号 f はアクリル樹脂の超音波透過曲線を

$$\left. \begin{aligned} [d/\lambda]_{\max} &= 0, \frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}, \frac{4}{2}, \dots\dots = \frac{n}{2} \\ [d/\lambda]_{\min} &= \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4}, \dots\dots = \frac{2n+1}{4} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

が得られる。

【0048】この超音波透過特性評価試験では、配管の壁厚が異なる内径 25mmφ のアクリル樹脂製、アルミニウム製、およびステンレス鋼製円管を使用し、供試流体として水を用いた。使用した超音波は、基本周波数 f_0 が 2MHz、4MHz のパルスビームである。2MHz と 4MHz の超音波パルスを用いたときのアルミニウム管、2MHz の超音波パルスを用いたときのステンレス鋼管の超音波透過特性を図 4 および図 5 にそれぞれ示す。横軸は超音波パルスの波長に対する壁厚比を、縦軸はドップラ強度（任意値）をそれぞれ示す。

【0049】図 4 からアルミニウム管では、1/2 波長および 1/1 波長のときに強いドップラ強度があり、ステンレス鋼管では、1/2 波長のときに図 5 に示すように強いドップラ強度が存在する。

【0050】この図 4 および図 5 の解析から、アルミニウム管では管厚に対し 1/2 波長および 1/1 波長を有する基本周波数 f_0 の超音波に強い透過現象が共鳴的に起きていることがわかり、ステンレス鋼管では、管厚に対し 1/2 波長の基本周波数 f_0 の超音波に強い透過現象が共鳴的に生じていることがわかる。

【0051】この図 4 および図 5 の超音波透過特性解析結果から、配管内を流れる被測定流体の流速分布を測定し、流量を計測する場合には、配管 11 の壁厚に対し共鳴的な透過現象を生じさせる基本周波数 f_0 の超音波が選択される。この超音波の基本周波数 f_0 は発振器 20 で発生しせめられる電気信号の周波数を調整することにより適宜選択される。

(B) ドップラ式超音波流量計の応答特性について

音波の基本周波数 f_0 にも関係していることを知見することができた。この知見に基づき、壁厚や超音波の基本周波数 f_0 もパラメータとして全体的な超音波の壁透過特性を調査し、実験的に検証した。

【0045】実験では、ドップラシフト強度を解析して超音波の透過特性を検証した。

【0046】音響インピーダンスを z とすると、液層（水） z_1 と壁厚 d の固体壁（管壁） z_2 の超音波透過係数 D は、一般に次式で表わされる。

【0047】

【数 8】

それぞれ示す。図 3 から超音波透過率が極大値および極小値を与える波長に対する壁厚 $[d/\lambda]$ は、

【数 9】

本実施形態におけるドップラ式超音波流量計を用いて、配管 11 内を流れる過度流量に対する応答特性を試験したところ、図 6 に示すように、非常に早い応答特性を示した。

【0052】この過度流量測定には、非常に早い流量変化を配管 11 内に生じさせる必要がある。配管 11 内に早い流量変化を生じさせるために口径が 25mmφ と小さい 2 本の並列配管を使用し、一方の配管にドップラ式超音波流量計 10 を、他方の配管に電磁流量計をそれぞれ設置する一方、並列配管の一侧に電磁弁を設け、この電磁弁を開閉させることで過度時の応答試験を行なった。

【0053】この過度流量応答試験では、測定位置（超音波流量計や電磁流量計設置位置）で被測定流体の流れは十分に発達しており、電磁流量計と超音波流量計 10 でそれぞれ流量モニタを行なった。超音波流量計 10 による被測定流体の流量測定は 1 本の超音波トランスジューサ 23 で配管直径上の流速分布を測定線方向に沿って求め、この流速分布を積分して流量とした。

【0054】ドップラ式超音波流量計を用いると、電磁弁 ON-OFF 時の立上がりや立下がり急俊であり、応答特性が非常に早く、精度よく測定できるので、非定常状態の流れに対する流量も精度よく測定できる。このため、配管内の中心軸上の流速を測定し、理論値から流速分布を仮定して流量を求める従来のドップラ式超音波流量計に対しても、大きな優位性を確認することができた。

【0055】次に、本発明に係るドップラ式超音波流量計の第 2 実施形態について添付図面を参照して説明する。

【0056】図7は、本発明に係るドップラ式超音波流量計の第2実施形態を示すものである。この実施形態に示された超音波流量計10Aは配管11にN個（ $N \geq 2$ ）の超音波トランスジューサ23i（ $i = 1, 2 \dots N$ ）を周方向に所要の間隔をおいて放射状に配置したものである。各超音波トランスジューサ23iは測定線MLが配管11の管軸線を通るように配置される一方、被測定流体12の流れ方向に配管管軸への垂線に対し角度 α で傾斜させたものである。

【0057】ドップラ式超音波流量計10Aはドップラシフト（周波数シフト）を利用した流速分布の線測定法であるから、被測定流体の流量測定精度を上げるためには、それだけ超音波トランスジューサ23iからの測定線MLの数を増大させ、面測定に近付けることを要する。

【0058】また、このドップラ式超音波流量計10AではUVPユニット13と各超音波トランスジューサ2

$$m(t) = \rho \int \int v_x(r, \theta, t) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$\approx \rho \left(\frac{\pi}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left\{ \int v_x(r, \theta_i, t) \cdot r \cdot dr \right. \dots\dots (6)$$

この(6)式より、ドップラ式超音波流量計10Aは、被測定流体12の流れの空間分布を、各測定線MLに沿って早い応答速度で得ることができ、配管11が非定常の流れで十分な助走区間をとれない場合や、弁の開閉やポンプの起動・停止で時間的な揺ぎが存在する場合、エルボ配管やU字形配管のように曲線流路が形成される場合にも、配管内を流れる流体の流速分布や流量を正確に精度よく測定できる。

【0061】具体的には、UVPユニット13から時間tにおいて、各超音波トランスジューサ23iの測定線ML上における速度分布がコンピュータ17に送られ、このコンピュータ17では、N本の測定線ML上の速度分布を半径方向に積分した上で、積分値を総和して被測定流体の流量を求めるようになっている。表示装置18では被測定流体の設置を時系列で表示するようになっている。

【0062】第2実施形態においては、配管11の外周壁に8個の超音波トランスジューサ23を設置した例を示したが、この場合、超音波トランスジューサ23は配管11の外周壁に周方向に間隔をおいて少なくとも2個設ければよい。その際、各超音波トランスジューサ23から発信される超音波パルスの測定線MLが測定領域内で少なくとも1回交差するように配置される。

【0063】このドップラ式超音波流量計10Aは、超音波トランスジューサ23から発信される超音波パルスのエコーがドップラシフトをすることを利用した流速分布の線測定方法であるが、各超音波トランスジューサ23からの超音波パルスの測定線を測定領域内で少なくとも1回交差させることにより、平面（二次元）測定とすることができ、空間情報が瞬時に得られ、測定精度が向

3iとの間に1台のマルチプレクサ30を設けて信号を振る方法を採用している。1台のマルチプレクサ30を設けて超音波パルス電気信号を振り分けたり、逆に各超音波エコー電気信号をコンピュータ17に送信する処理をすることで、測定に要する時間が長くなるが、コストの低減を図ることができる。マルチプレクサ30を設けても、現在要求されている流量計に求められる高速性は十分に維持できる。他の構成は、図1に示されたドップラ式超音波流量計10と異ならないので同一符号を付して説明を省略する。

【0059】配管11に超音波トランスジューサ23i（ $i = 1 \dots N$ ）をN個据付けたとき、配管11内を流れる時間tの流量m(t)は、(2)式から次式のように表わされる。

【0060】

【数10】

上する。

【0064】その際、超音波トランスジューサ23は3個ずつが組をなし、組をなす3個の超音波トランスジューサ23から発信される超音波パルスの測定線が測定領域内の1点で交差するように配置することにより、交点の速度ベクトルを立体的（三次元）に測定できる。したがって、3個ずつ組をなす超音波トランスジューサ23を少なくとも2組備えることで、エルボ配管やU字状配管のように曲り配管内に流れる被測定流体の流速も精度よく測定することができる。

【A】被測定流体の時間依存ベクトル分布を求める方法ところで、比較的大口径、例えば280mmの配管11を用いると、内部を流れる被測定流体の流速分布は3次元分布になると考えられ、大口径配管11内での流体の流れは、多くの場合3次元の非定常流となる。

【0065】実験室レベルの実験では、口径280mmの亚克力樹脂製の配管11（内管）を用意し、図示しない整流器から590mmの位置に超音波トランスジューサ23iを20本周方向に等間隔に放射状に設置した。このトランスジューサ23iの設置部である測定部における被測定流体の流れは未発達流となる。各超音波トランスジューサ23iは配管11の管壁垂線に対し、流体流れ方向の傾き角 α を 20° に設定した。

【0066】このドップラ式超音波流量計における超音波トランスジューサ23iの配管構造では20本の測定線MLから実質的に231個の交点上の2次元速度ベクトルを図8に示すように求める。すなわち、大口径配管11内における被測定流体12の流れを配管横断面（測定線MLにおける傾斜角 α （ 20° ）は、横断面方向に簡単に較正することができる。）で2次元マッピングを

行ない、時間依存の速度ベクトル分布を求めることができた。このとき、被測定流体 12 の流量は $271/\text{sec}$ であり、この流量に応じて UVP ユニット 13 の最適化を行なったところ、一枚の流速分布を求めるのに必要な時間は 64 msec であった。

【0067】この実験では、UVP ユニット 13 にマルチプレッサ 30 を内蔵したタイプのものを使用し、各超音波トランスジューサ 23 i を 1024 枚のプロフィール測定毎に切り替えるモードで使用した。また、この実験では、流速分布データの取得のみを行ない、2次元マッピングのためのベクトル計算はオフライン接続されたコンピュータ 17 で演算処理した。図 8 はこのようにして求められた大口径配管 ($280\text{ mm } \phi$) 11 内を流れる被測定流体 12 の時間平均における速度ベクトル図を示す。この時間依存ベクトル分布図からも分かるように、図 8 の右上部分や左下部分の流れが乱され、非定常の流れとなっている。

【B】 常温常圧下における流速分布・流量測定試験

次に、工業用ステンレス鋼配管 (内径 $250\text{ mm } \phi$, $400\text{ mm } \phi$) を用いて、ドップラ式超音波流量計により流量測定試験を行なった。この流量測定試験では、実機プラントへの適用を考慮し、超音波トランスジューサ 23 から送信される超音波パルスの基本周波数 f_0 、超音波トランスジューサ 23 の径、装着方法を種々変えて試験を実施した。

【0068】この流量測定試験は、循環用ポンプを備えた流体循環用試験ループを構成し、この試験ループ内に循環ポンプ 2 台の他、脱泡用タンク、流量調節弁、循環水不純物除去用 $5\text{ }\mu$ のマイクロフィルタを設置し、さらに、試験ループの測定試験配管部には約 7 m のステンレス鋼配管を使用し、ほぼ中央にドップラ式超音波流量計を取付け、試験測定部の上流側に整流格子板を、その下流側にオリフィス式流量計および電磁流量計をそれぞれ装着した。

【0069】流量測定試験は、 $250\text{ mm } \phi$ および $400\text{ mm } \phi$ のステンレス配管を使用して定常流、非定常流について実験を実施した。超音波トランスジューサの発信基本周波数は $1, 2, 4\text{ MHz}$ で入射角度とトランスジューサ径を変えて最適測定条件をサーベイした。

【0070】基本周波数 f_0 が 1 MHz 、測定試験部のステンレス鋼透過厚さが 2.87 mm のステンレス鋼配管 (内径 $250\text{ mm } \phi$) を用意し、1つの超音波トランスジューサ 23 による流速分布測定結果を図 9 に示す。

【0071】図 9 は超音波トランスジューサからの入射角度が未補正であり、超音波入射側の壁近傍の影響や反射エコーの影響が未補正のデータであるが、ステンレス鋼配管を通して超音波エコーが良く捉えられ、流速分布が精度よく明瞭に測定されている。超音波エコーは超音波パルス入射側の壁近傍が何らかの原因で鮮明に表示されない以外、残りの部分、特に超音波入射側と反対側の

半径方向部分で流速分布を正確に精度よく検出することができた。

【0072】また、ドップラ式超音波流量計は、過度時の流れの揺ぎに対しても、 $50\text{ msec} \sim 100\text{ msec}$ の速度で応答可能であり、常温常圧下での流速分布・流量測定試験の測定データをオリフィス式 (差圧) 流量計および電磁流量計による測定値と比較した。比較結果は図 10 および図 11 に示す。

【0073】図 11 は図 10 に示された過度時の応答特性を部分的に拡大したものである。過度時の超音波流量計 10 による応答特性曲線 g を図 10 および図 11 に示すように、電磁流量計の応答特性曲線 h に比べ、流量増加時 (立上がり時) も流量減少時 (立下がり時) もともに非常に早い応答特性が得られ、オリフィス式流量計による応答特性曲線 i とほぼ同等の早い応答特性であった。

【0074】したがって、ドップラ式超音波流量計を用いると、電磁流量計に較べ応答特性が非常に早く、非接触で精度よく測定でき、NS 方程式の時間微分項を配慮した非定常状態の流れに対する流量も精度よく測定できる。このため、配管内の中心軸上の流速を測定し、理論値から流速分布を仮定して流量を求める従来のドップラ式超音波流量計に対しても、大きな優位性を確認することができた。

【0075】図 12 は本発明に係るドップラ式超音波流量計の第 3 実施形態を示すものである。

【0076】この実施形態に示されたドップラ式超音波流量計 10 B は、超音波トランスジューサ 23 i 毎に UVP ユニット 13 を用意し、各 UVP ユニット 13 で超音波トランスジューサを個別に制御できるようになっている。他の構成は、図 7 に示される超音波流量計と異ならないので説明を省略する。

【0077】図 12 に示されたドップラ式超音波流量計 10 B は各超音波トランスジューサ 23 i 毎に UVP ユニット 13 を備えたので、その分コストアップになるが、各 UVP ユニット 13 からの基本周波数 f_0 を個別に調節制御し、独立して決定できるので、配管 11 の壁厚が一樣でない場合や、高速での流速分布や流量測定が要求される場合に適する。

【0078】

【発明の効果】以上に述べたように本発明に係るドップラ式超音波流量計においては、超音波のドップラシフトを利用して被測定流体の流速分布を測定領域に沿って測定することができ、この流速分布を積分して測定領域を流れる流量を時間依存で迅速に応答性良く計測することができるので、定常状態の流れだけでなく、非定常状態の流れについても正確に精度よく、非接触で測定することができる。

【0079】また、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、配管内を流れる被測定流体の流速分布を超音波の

トップラシフトを利用して測定線に沿って精度よく非接触で測定でき、時間的に変動する過渡時の流量を精度よく時間依存で測定できる。

【0080】さらに、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、超音波送信手段から送信される超音波パルスは、配管等の壁厚に対し共鳴的透過現象を生じさせる基本周波数に選択されたので、超音波トランスジューサから発信される超音波パルスを被測定流体に優れたS/N比で効率よく送受信させることができ、流速分布や流量の測定精度を向上させることができる。

【0081】さらにまた、超音波トランスジューサを少なくとも2つ設け、一方のトランスジューサからの超音波パルスによる測定線が他方の超音波トランスジューサからの測定線と測定領域で少なくとも1回交差させることにより、交点における速度ベクトルをより正確に精度よく求めることができ、流量の計測精度を向上させることができる。さらに、超音波トランスジューサが3個ずつ組をなし、組を構成する3個の超音波トランスジューサから発信される超音波パルスによる測定線が測定領域上の1点で交差するように配置すると、交差位置での速度ベクトルを立体的に求めることができ、エルボ配管やU字状配管のような曲線流路上の速度分布も正確に測定できる。

【0082】また、本発明に係るドップラ式超音波流量計は、ドップラシフトを利用して被測定流体の測定線に沿う流速分布を測定することにより、大きな空間を流れる流量系の一部の流量を時間依存で時系列的に計測することができる。さらに、光学的流量測定方法が適用できない不透明あるいは半透明の流体の流量をも精度よく、正確に測定することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るドップラ式超音波流量計の一実施形態を示す簡略的な構成図。

【図2】本発明に係るドップラ式超音波流量計による流量測定における作動原理を説明する図。

【図3】ステンレス鋼およびアクリル樹脂の超音波透過特性を説明する図。

【図4】アルミニウムの超音波透過特性を、壁厚に対するドップラ強度の測定により表示した図。

【図5】ステンレス鋼の超音波透過特性を、壁厚に対するドップラ強度の測定により表示した図。

【図6】配管内を流れる過渡時の流量割合がドップラ式超音波流量計の応答特性を説明した図。

【図7】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第2実施形態を示す簡略的な構成図。

【図8】配管内を流れる被測定流体の横断面（あるいは測定領域）における速度ベクトルを示す図。

【図9】本発明に係るドップラ式超音波流量計で実測された被測定流体の直径方向の流速分布の測定データを示す図。

【図10】本発明に係るドップラ式超音波流量計の応答特性を電磁流量計およびオリフィス式流量計と比較して示す図。

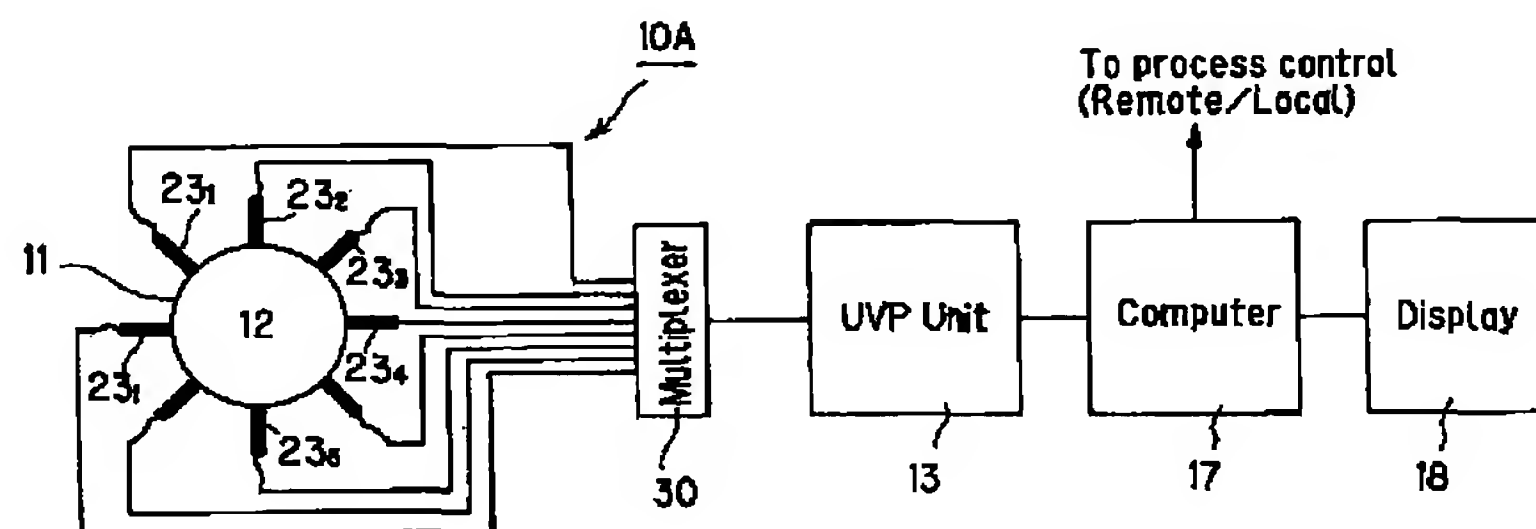
【図11】図10の一部を部分的に時間拡大して示す図。

【図12】本発明に係るドップラ式超音波流量計の第3実施形態を簡略的に示す図。

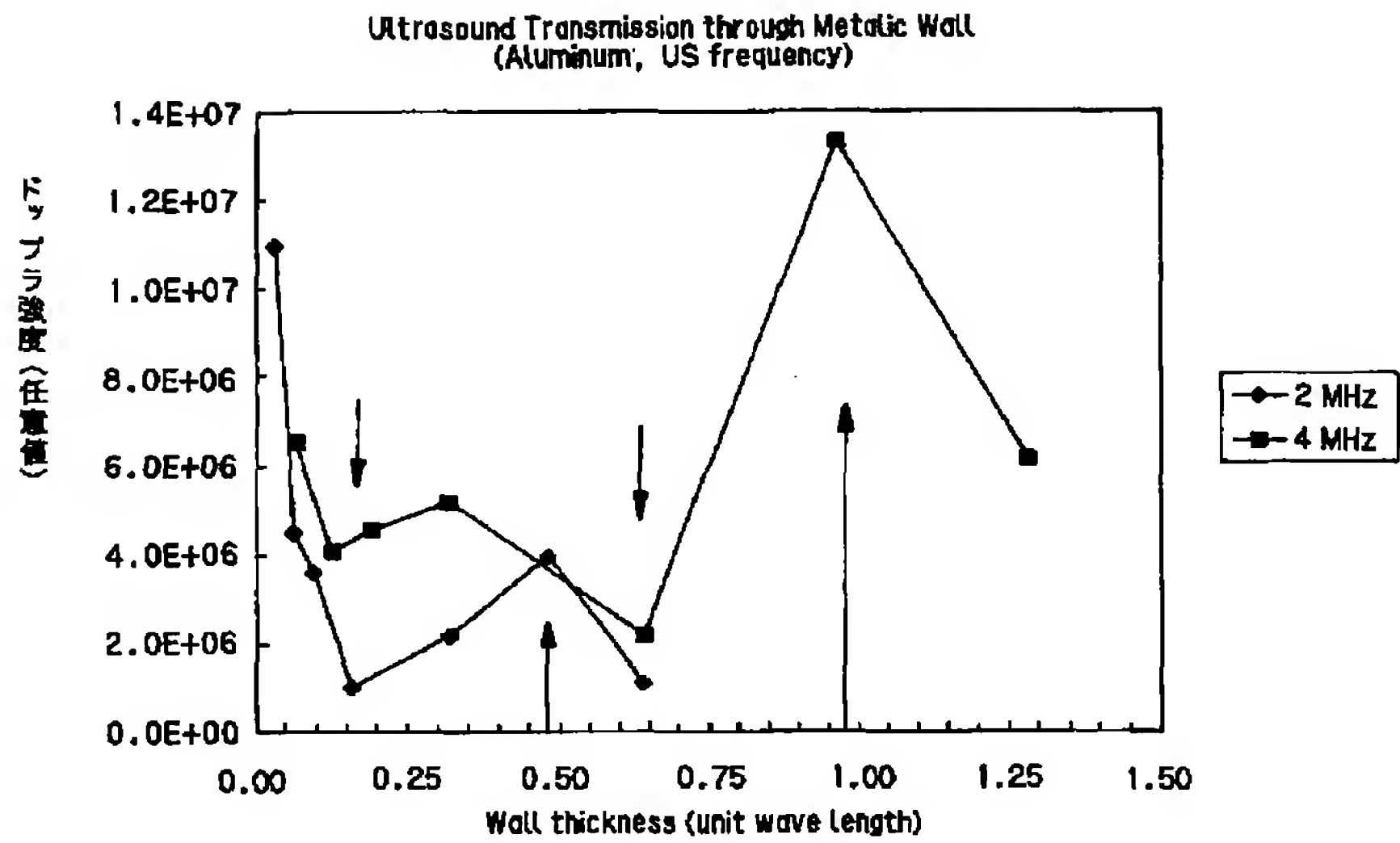
【符号の説明】

- 10 ドップラ式超音波流量計
- 11 配管
- 12 被測定流体
- 13 超音波速度分布計測ユニット (UVPユニット)
- 15 超音波送信手段
- 16 流体速度分布測定手段
- 17 コンピュータ (流量演算手段)
- 18 表示装置
- 20 発振器
- 21 エミッタ
- 22 信号発生器
- 23 超音波トランスジューサ
- 24 増幅器
- 25 AD変換器
- 26 流速分布計測回路
- 30 マルチプレクサ

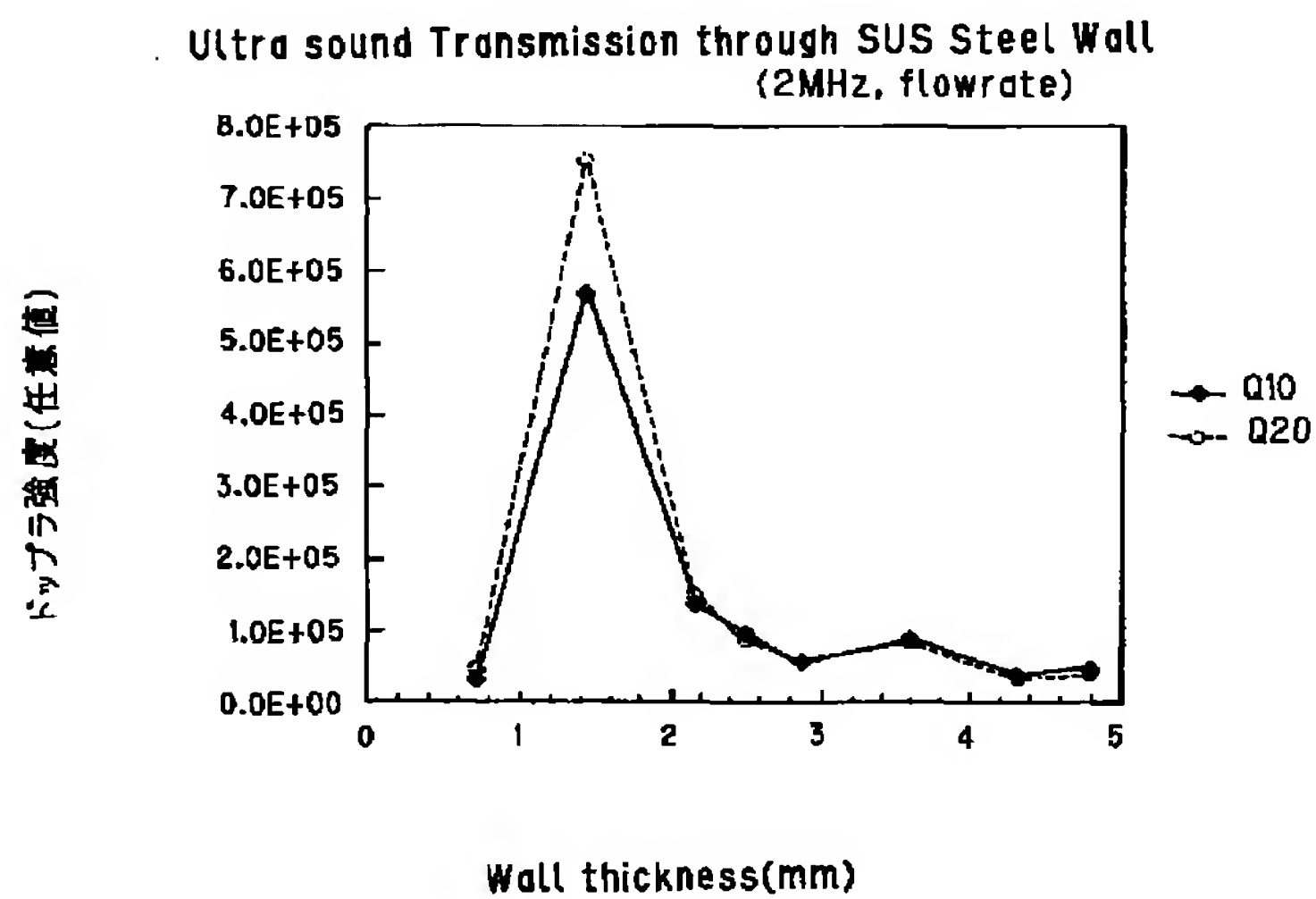
【図7】



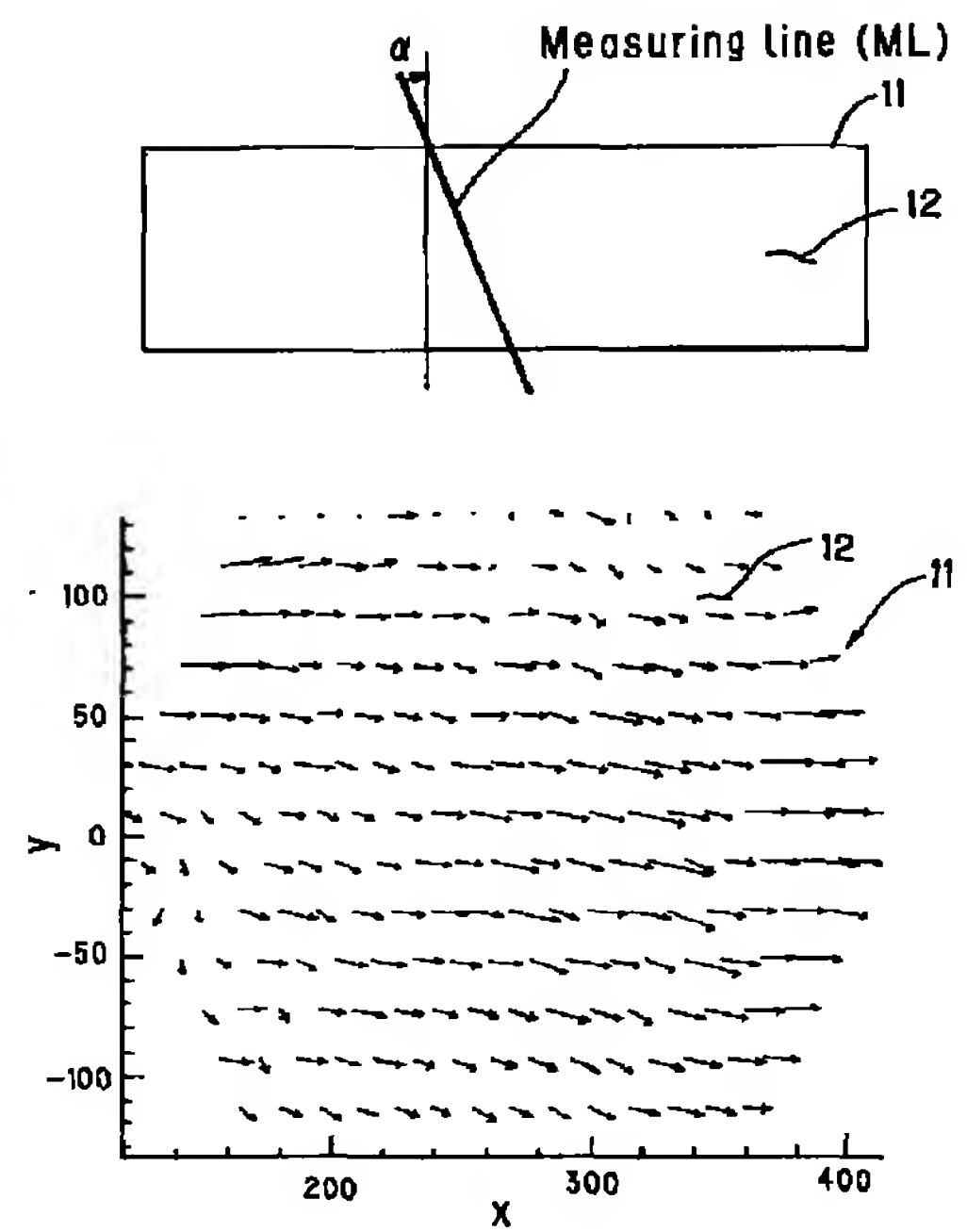
【図 4】



【図 5】

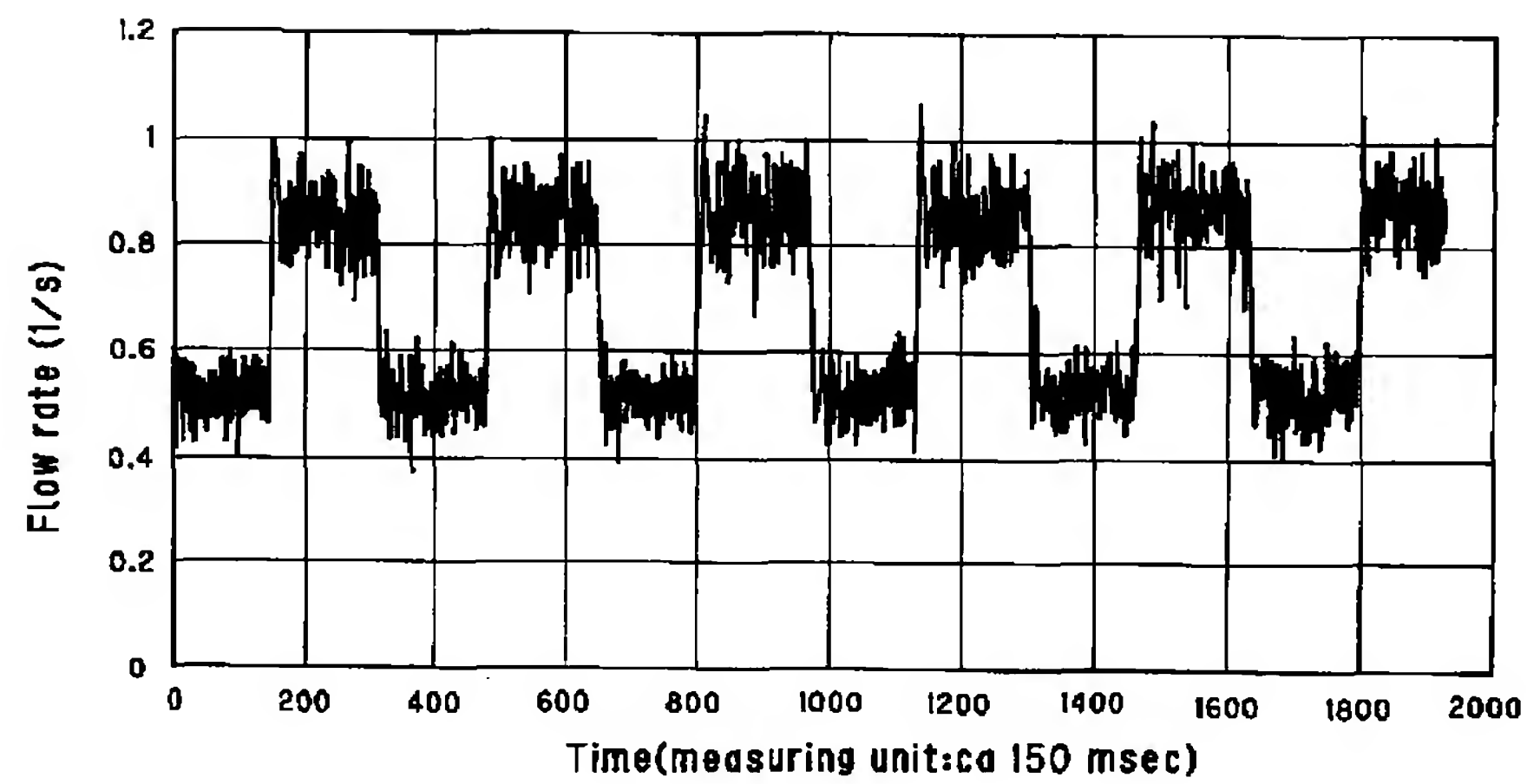


【図 8】



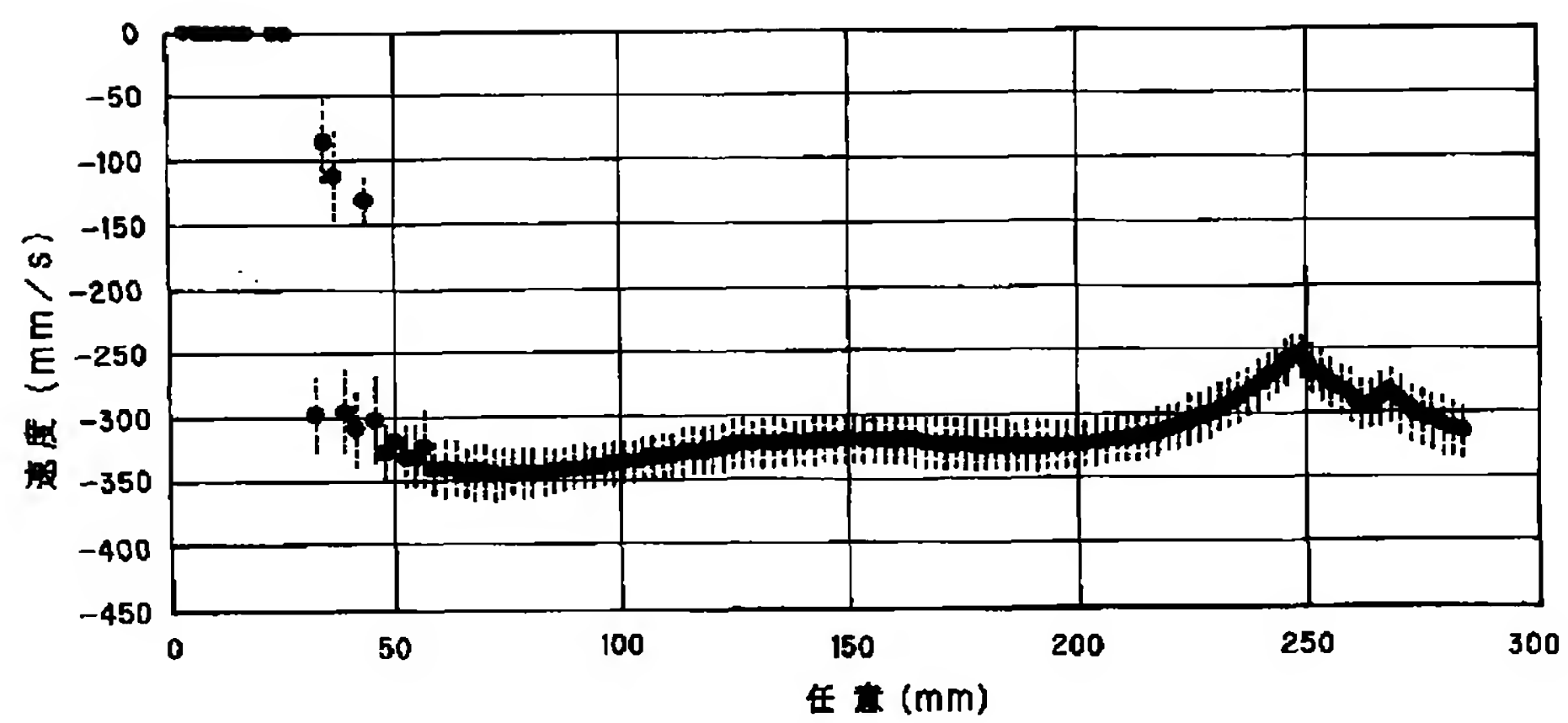
【図 6】

Transient flow rate in a pipe



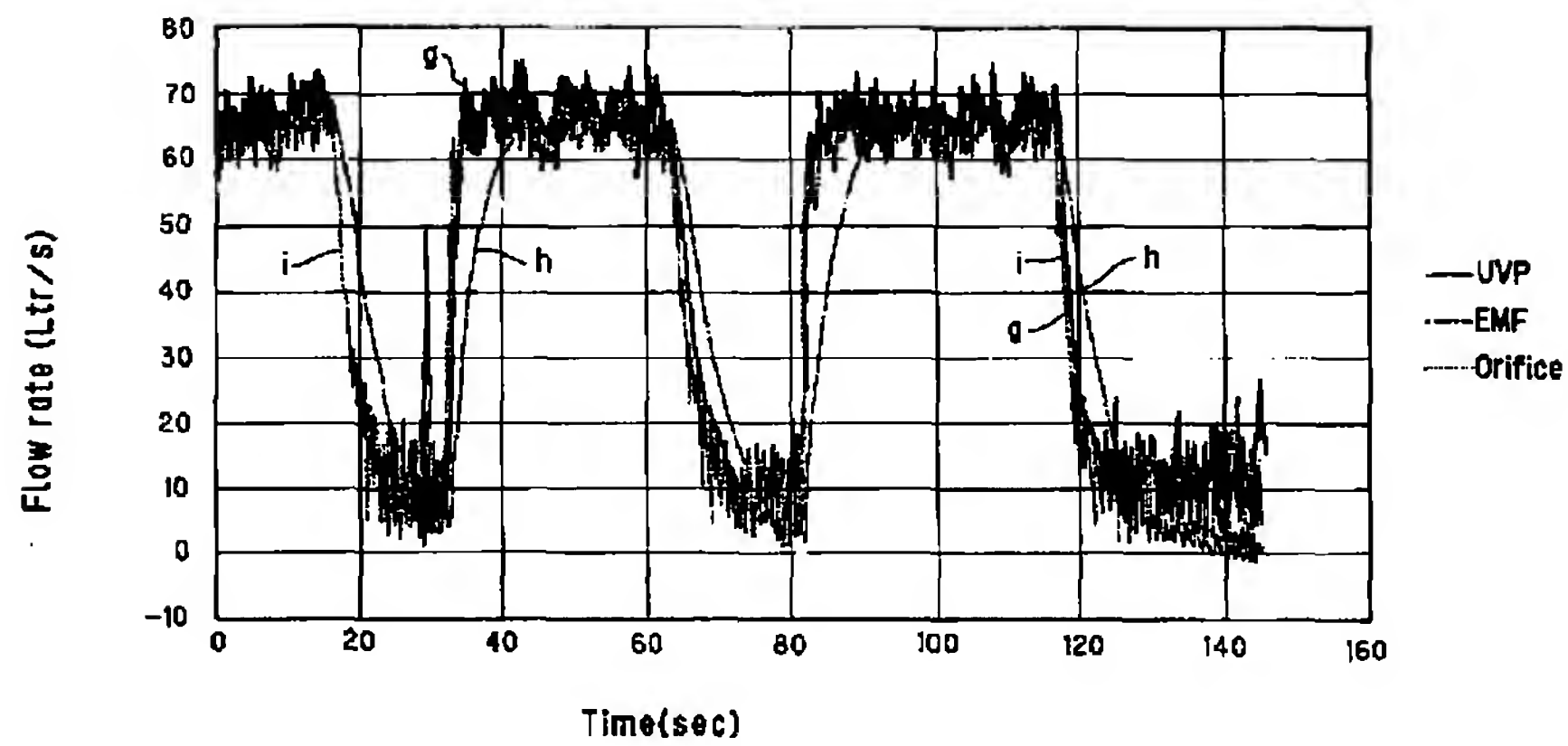
【図 9】

Velocity profile



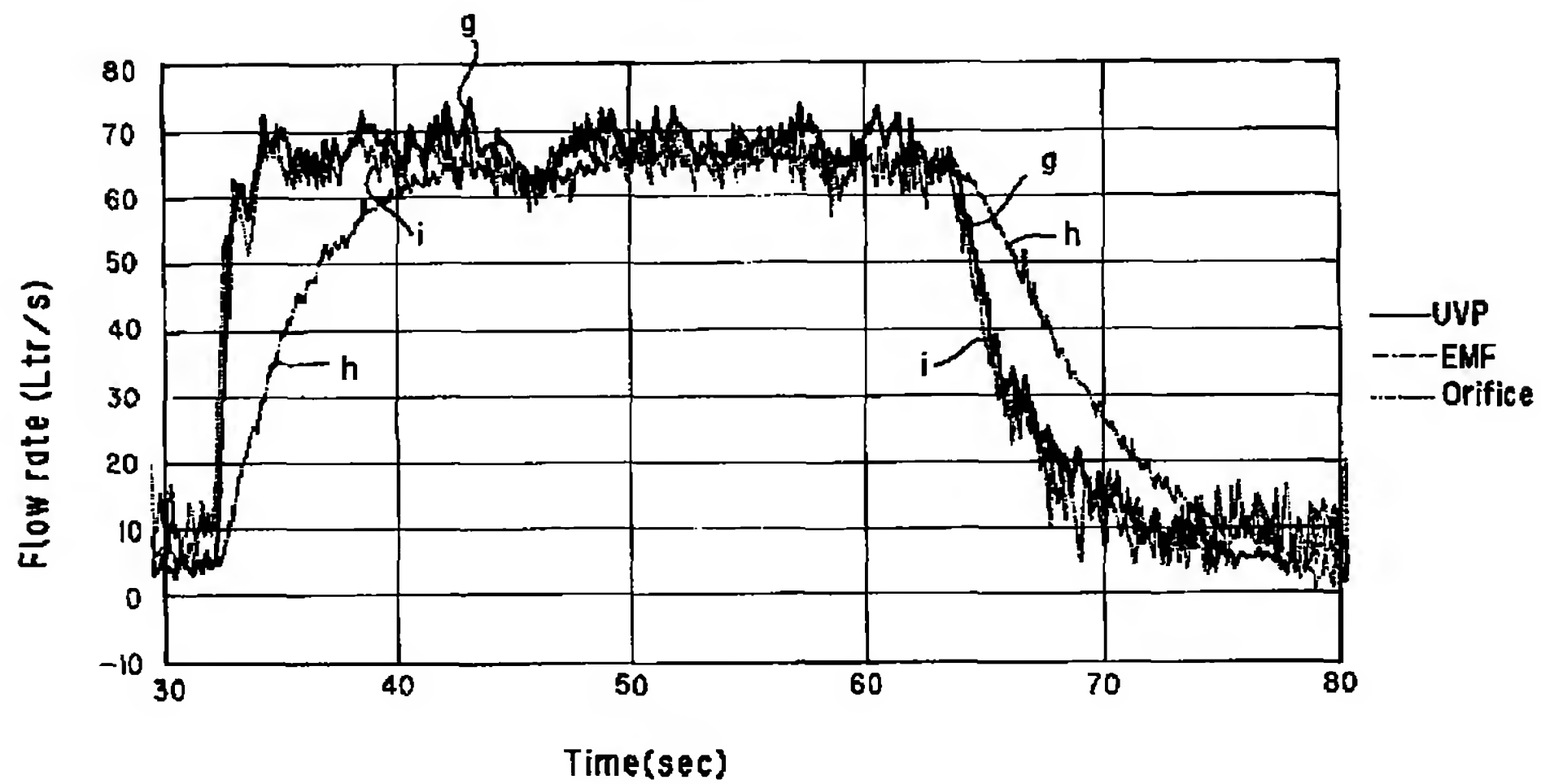
【図 10】

Transient flow rate(comparison)



【図 11】

Transient flow rate(comparison)



【図 12】

